

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240233

基于稀疏信息差值的集电线路故障精准定位方法

高兴, 王晓东, 刘颖明

(沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要: 针对集电线路多分支网络结构故障定位过程时精度易受测点数量和行波波速影响的问题, 提出一种基于稀疏信息差值的集电线路故障定位方法。按照集电线路划分故障区域。首先, 通过变分模态分解从初始行波信号中提取第一本征模函数信号, 并通过 Stockwell 变换将其进一步分解为 S 矩阵。然后, 通过 S 矩阵计算其模矩阵 Q , 并计算所有模矩阵之间的能量相似性, 建立区域决策矩阵来识别故障区域。最后, 在确定的故障区域内设置虚拟故障点, 根据故障区域首末端初始行波到达时间, 计算测量行波和虚拟故障点之间的信息差异度, 采用离散-连续粒子群实时修正故障分支和故障位置。仿真结果表明, 该方法无需集电线路所有分支行波信息, 大幅降低监测设备数量, 消除波速影响, 实现多分支集电线路的精准故障定位。

关键词: 风电场; 集电线路; 行波法; 故障定位; Stockwell 变换

Accurate fault location of collecting lines based on sparse information difference

GAO Xing, WANG Xiaodong, LIU Yingming

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: A fault location method for collector lines based on sparse information difference is proposed to address the issue of accuracy being easily affected by the number of measurement points and traveling wave speed during the fault location process of multi branch network structures in collector lines. The fault area is divided according to the collector line. First, this paper extracts the first intrinsic mode function signal from the initial traveling wave signal through variational mode decomposition, and further decomposes it into an S matrix through the Stockwell transform. Then, the modulus matrix Q is calculated through the matrix S , and the energy similarity between all modulus matrices is calculated to establish a regional decision matrix to identify the fault area. Finally, a virtual fault point is set within the determined fault area. Based on the initial arrival time of the traveling waves at the beginning and end of the fault area, the information difference between the measured traveling waves and the virtual fault point is calculated. Discrete-continuous particle swarm optimization is used to simultaneously correct the fault branch and fault location. The simulation results show that this method does not require traveling wave information from all branches of the collector line, significantly reduces the number of monitoring devices, eliminates the influence of wave speed, and achieves accurate fault localization of multi branch collector lines.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52007124).

Key words: wind farms; collecting line; traveling wave method; fault location; Stockwell transformation

0 引言

风电以其储量丰富等特点正迅速成为可再生能源供应系统的重要组成部分^[1-3]。集电线路工作环境恶劣且呈现典型的多分支结构^[4]。因此, 随着风电

场规模的不断扩大, 低成本、快速准确的集电线路故障精准定位对提升风电场的供电可靠性具有重要的意义^[5-6]。

行波法利用故障行波的传播和反射特性来定位故障, 可进一步分为单端法和双端法^[7-10]。因其不受故障参数和系统运行方式影响等优点成为众学者的研究热点^[11-13]。文献[14]提出改进单端行波定位方法, 提高了定位精度, 却仅限于分支较少的简

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52007124); 辽宁省揭榜挂帅科技攻关专项资助(2021JH1/10400009)

单拓扑结构系统。随着分支数量的增加，故障定位的精度和可靠性将大幅降低。文献[15-16]解决了多分支系统行波故障定位问题，将行波法推广至多分支系统，然而该方法需要在所有线路末端装设行波采集设备。文献[17]基于等效思想考虑了行波波速变化问题，但应对多分支结构系统故障定位时，仍需要大量的测点信息。上述文献应对拥有数十以上终端的典型多分支风电场集电线路故障定位问题时，经济性和适用性将成为重要制约因素。文献[18-19]基于双端行波法建立了固有拓扑和故障拓扑的差异化矩阵、推导出具体的分支判断依据，仅用少量测点信息即可完成多分支系统的故障精准定位，然而该类方法需要对线路网络结构进行复杂的解网操作以建立相应的故障判据。

风电场由多条集电线路组成，每条集电线路又呈现多分支、多端电源的典型网络拓扑结构特点。针对已有行波法应对集电线路多分支结构故障定位时存在的需要大量测点信息及波速不确定的问题，本文提出一种基于稀疏信息差值的集电线路故障定位方法。

该方法为了确定故障集电线路，首先通过变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)提取初始故障信号的第一本征模态分量(intrinsic mode function, IMF)。通过斯托克韦尔变换(Stockwell transform, ST)获取故障矩阵 Q 。分析健全集电线路和故障集电线路之间的能量关系确定故障集电线路。故障集电线路确定之后，采用文献[18]所述行波提取方法确定故障集电线路两端的行波到达时间。分析了故障点在任意分支时集电线路首末端测点信息的行波时差特性，消除波速影响，量化伪故障点与实际故障点之间的信息差异，采用改进粒子群算法计算故障分支和故障位置，实现对风电场集电线路的精准故障定位。

1 基于信息差异度的故障集电线路识别

1.1 风电场故障信号时频特征

以图 1 典型风电场简化拓扑为例进行分析。在故障发生后，故障点两侧系统的响应过程是相互独立的，根据行波传播理论，故障信号会沿图 1 中虚线箭头方向向各测点进行传播。F-S0-S2 或 F-S0-S_n 称为故障点上游故障信号传播路径。F-S1 为下游信号传播路径。尽管故障点同侧测点故障信号的幅值会受线路阻抗变化的影响，但集电线路分支长度一般在 5 km 以内。因此故障点同侧故障信号时频差异程度较小，而不同侧则呈现不同的时频特征。

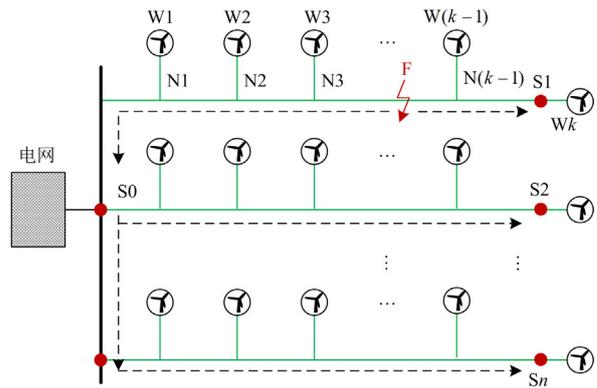


图 1 风电场简化拓扑结构示意图

Fig. 1 Simplified topological structure diagram of WF

为了展示故障后零序电压信号 v_0 的变化趋势，在图 1 所示第一条集电线路分支 N1W1 距离 S0 测点 2.3 km 处设置 A 相接地故障(AG)，故障电阻设置为 10 Ω，故障后 S0、S1 和 S2 三个测点有无噪声影响下的 v_0 如图 2 所示。

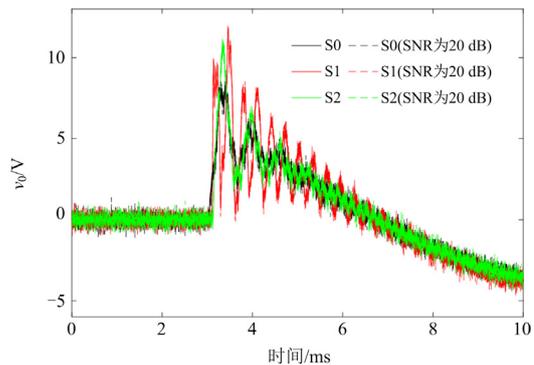


图 2 故障后不同测点 v_0 的变化趋势

Fig. 2 Trend of v_0 changes at different measuring points

由图 2 可以看出：

1) 故障点不同侧测点(S0 和 S1)故障信号 v_0 波动趋势存在较大差异，但故障点同侧测点(S0 和 S2)的 v_0 的波动趋势则基本相似；

2) v_0 的波动趋势在振幅上的差异主要存在于故障后的 1/2 周期，随着故障时间的延长，差异性逐渐消失；

3) 实际测量中噪声问题无法避免，噪声会导致故障信号产生一定程度上的波动，掩盖部分故障信息，严重时将导致 v_0 的差异性和相似性消失。

1.2 基于 VMD-ST 的模矩阵生成

为了充分保留集电线路故障后不同测点信息之间的差异性，同时减少噪声的影响，本文引入 VMD 和 ST 来提取故障信号的时频特性。VMD 可通过迭

代搜索变分模型的最优解来确定各分量的中心频率和带宽, 抑制模态分量的混叠现象^[20-21]。VMD 可将原始信号分解成 k 个 IMF, 更新表达式^[22]如式(1)和式(2)所示。

$$\hat{v}_k^{n+1}(f) = \frac{\hat{v}(f) - \sum_{i \neq k} \hat{v}_i(f) + \frac{\hat{\zeta}(f)}{2}}{1 + 2\varphi(f + f_k)^2} \quad (1)$$

$$f_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty [f \cdot |\hat{v}_k(f)|^2] df}{\int_0^\infty |\hat{v}_k(f)|^2 df} \quad (2)$$

式中: $\hat{v}_k^{n+1}(f)$ 为当前余量的维纳滤波; $\hat{v}(f)$ 、 $\hat{v}_i(f)$ 、 $\hat{\zeta}(f)$ 分别为 v_0 、当前模态分量、拉格朗日乘子的傅里叶变换; φ 为二次惩罚项; f 和 f_k 分别为原始信号和第 k 个 IMF 分量的中心频率; f_k^{n+1} 为当前模态分量的中心频率; $\hat{v}_k(f)$ 为第 k 个 IMF 分量的傅里叶变换。

以 1.1 节中故障案例为例。集电线路故障后 S0 测点故障信号 v_0 经 VMD 分解的部分结果如图 3 所示。

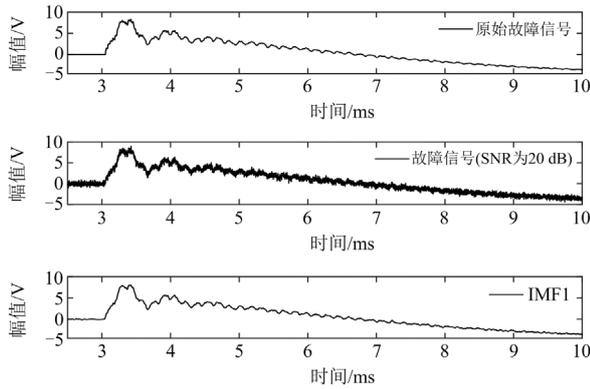


图 3 故障信号分解结果

Fig. 3 Fault signal decomposition results

由图 3 可知: 故障信号经 VMD 后, 故障信号与第一本征模分量 IMF1 从趋势和波动情况上更加相似, 可有效解决测量噪声问题, 最大程度地保留原始故障信号的特征。因此, 本文保留 IMF1, 对集电线路故障后的 IMF1 进行 ST 变换。

如前所述, 为了保留不同测点故障信号之间的差异性, 引入 ST。ST 计算如式(3)^[23]所示。

$$\mathbf{S} \left[qT, \frac{n}{NT} \right] = \sum_{p=0}^{N-1} v_{\text{IMF1}} [pT] \left[\frac{p+n}{NT} \right] e^{-2\pi^2 p^2} e^{\frac{i2\pi qp}{N}} \quad (3)$$

式中: q 、 n 、 $p=0,1,2,\dots,-1$; N 为故障数据长度, 本文提取的故障后零序电压 v_0 为故障后 1/2 周

期的故障数据, 即 $N=10\,000$; T 为采样频率, 考虑到行波提取需要 T 大于 500 kHz, 因此本文将 T 设置为 1 MHz; v_{IMF1} 为 v_0 通过 VMD 后保留的第一本征模分量。

v_{IMF1} 通过式(3)最终生成一个 5000×10000 的复数矩阵, 称为矩阵 \mathbf{S} 。为了量化故障信息, 基于式(4)即可得到 \mathbf{S} 的模矩阵 \mathbf{Q} 。

$$\mathbf{Q}(5000,10000) = |\mathbf{S}(5000,10000)|^2 \quad (4)$$

1.3 基于信息差异度的故障区域识别方法

为了量化故障后 v_{IMF1} 所有故障信息, 量化不同测点信息差异度, 定义集电线路不同测点信息差异度为

$$\xi_{S_j}^{S_i} = \frac{\left| \sum_{S_i} \sum_{S_j} (\mathbf{Q}_{S_i})^2 - \sum_{S_i} \sum_{S_j} (\mathbf{Q}_{S_j})^2 \right|}{\sum_{S_i} \sum_{S_j} (\mathbf{Q}_{S_i})^2 + \sum_{S_i} \sum_{S_j} (\mathbf{Q}_{S_j})^2} \leq 1 \quad (5)$$

式中: $\xi_{S_j}^{S_i}$ 为 \mathbf{Q}_{S_i} 和 \mathbf{Q}_{S_j} 之间的信息差异度; \mathbf{Q}_{S_i} 、 \mathbf{Q}_{S_j} 分别为测点 S_i 、 S_j 测量到的 v_{IMF1} 的模矩阵。

基于式(5)可以看出: $\xi_{S_j}^{S_i}$ 越大, 表示 \mathbf{Q}_{S_i} 和 \mathbf{Q}_{S_j} 之间的元素差异越大。再结合 1.1 节分析可知: \mathbf{Q}_{S_i} 和 \mathbf{Q}_{S_j} 之间的差异度即可表示测点 S_i 、 S_j 采集到的 v_{IMF1} 的时频差异性。 $\xi_{S_j}^{S_i}$ 可量化不同测点信息差异度。在故障点同游测点, 两测点 v_{IMF1} 基本相同, 即 $\xi_{S_j}^{S_i}$ 近似为 0。在故障点不同游测点, 两测点 v_{IMF1} 差异度越大, $\xi_{S_j}^{S_i}$ 越接近 1。

2 基于行波时差的故障位置优化求解

2.1 集电线路行波时差特性分析

由图 1 可知, 风电场任意集电线路都是典型的多分支结构, 基于第 1 节所提方法确定故障集电线路后, 下一步需对故障精准位置进行求解。任意集电线路结构如图 4 所示。

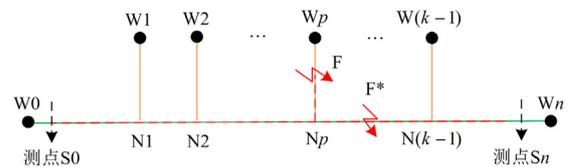


图 4 任意集电线路简化拓扑

Fig. 4 Simplified topology of arbitrary collecting lines

当集电线路任意分支 F 处发生故障之后, 故障行波到达两侧测点 S_0 和 S_n 的时间记为 t_{S_0} 和 t_{S_n} 。则 t_{S_0} 和 t_{S_n} 如式(6)所示。

$$\begin{cases} t_{S0} = d_{F-S0}/v_{tw} \\ t_{Sn} = d_{F-Sn}/v_{tw} \end{cases} \quad (6)$$

式中： d_{F-S0} 和 d_{F-Sn} 分别为故障点F到测点S0和Sn的最短距离； v_{tw} 为初始行波传播波速。则故障后S0和Sn波头时间信息差可表示为

$$t_{S0} - t_{Sn} = (d_{F-S0} - d_{F-Sn})/v_{tw} \quad (7)$$

当集电线路任意分支上F处发生故障之后，在拓扑结构已知的情况下，故障位置之间的关系始终满足式(8)一式(10)。

$$d_{F-S0} - d_{F-Sn} = d_{Np-S0} - d_{Np-Sn} \quad (8)$$

$$d_{F-S0} = d_{Np-S0} + d_{F-Np} = t_{S0}v_{tw} \quad (9)$$

$$d_{F-Sn} = d_{Np-Sn} + d_{F-Np} = t_{Sn}v_{tw} \quad (10)$$

式中： d_{Np-S0} 、 d_{Np-Sn} 分别为故障点F的最近节点Np到测点S0和Sn的最短距离， d_{Np-S0} 和 d_{Np-Sn} 在集电线路拓扑结构已知的情况下为确定值； d_{F-Np} 为故障点F到最近节点Np的最短距离。

则故障行波实际传播长度可以表示为

$$d_{F-S0} + d_{F-Sn} = d_{Np-S0} + d_{Np-Sn} + 2d_{F-Np} = d_{S0-Sn} + 2d_{F-Np} = (t_{S0} + t_{Sn})v_{tw} \quad (11)$$

基于式(11)，故障行波波速 v_{tw} 可改写为式(12)。

$$v_{tw} = \frac{d_{S0-Sn} + 2d_{F-Np}}{t_{S0} + t_{Sn}} \quad (12)$$

一般来说，线路阻抗越大，行波信号的传播速度越慢。尽管集电线路故障线路总阻抗较小，对波速影响较小，但为了消除行波波速对精准定位的影响，本文联立式(12)、式(9)和式(10)，则 t_{S0} 和 t_{Sn} 可改写为

$$t_{S0} = \frac{d_{F-S0}}{d_{S0-Sn} + 2d_{F-Np}}(t_{S0} + t_{Sn}) \quad (13)$$

$$t_{Sn} = \frac{d_{F-Sn}}{d_{S0-Sn} + 2d_{F-Np}}(t_{S0} + t_{Sn}) \quad (14)$$

基于式(13)和式(14)，则故障后S0和Sn波头时间信息差又可表示为

$$t_{S0} - t_{Sn} = \frac{t_{S0} + t_{Sn}}{d_{S0-Sn} + 2d_{F-Np}}(d_{F-S0} - d_{F-Sn}) \quad (15)$$

对比式(7)和式(15)，可以看出式(15)消除了 v_{tw} 对时间信息差的影响。将式(15)中 t_{S0} 和 t_{Sn} 提取至一侧，则故障行波时间信息关系 T_F 和伪故障点F*的信息关系 T_{F^*} 分别为

$$\begin{cases} T_F = \frac{t_{S0} - t_{Sn}}{t_{S0} + t_{Sn}} \\ T_{F^*} = \frac{d_{F^*-S0} - d_{F^*-Sn}}{d_{S0-Sn} + 2d_{F^*-Np}} \end{cases} \quad (16)$$

式中： d_{F^*-S0} 和 d_{F^*-Sn} 分别为伪故障点F*到测点S0和Sn的最短距离； d_{F^*-Np} 为伪故障点F*到最近节点Np的最短距离。

比较F和F*故障之后时间信息关系 T_F 和 T_{F^*} ，定义故障位置时间信息差系数 ΔT 为

$$\Delta T = \left| \frac{t_{S0} - t_{Sn}}{t_{S0} + t_{Sn}} - \frac{d_{F^*-S0} - d_{F^*-Sn}}{d_{S0-Sn} + 2d_{F^*-Np}} \right| \quad (17)$$

对于真实故障F发生之后， t_{S0} 和 t_{Sn} 可由实际测点信息测量得到。对于伪故障点F*，当集电线路拓扑不变时， d_{S0-Sn} 是唯一不变的。 d_{F^*-S0} 、 d_{F^*-Sn} 和 d_{F^*-Np} 在任意位置时也是唯一的。因此，通过上述分析可知，当且仅当F和F*重合时，真实故障点F的 T_F 才和伪故障点F*的 T_{F^*} 完全一致，此时， $\Delta T = 0$ 。

2.2 集电线路行波优化求解

为了实现伪故障点F*与真实故障点F的重合，实现集电线路的精准定位，本文以式(17)时间信息差系数 ΔT 最小为优化目标，以伪故障点F*位置为优化求解目标，采用改进粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法完成集电线路故障位置的精准求解。

伪故障位置通过随机在可行域进行移动迭代更新。为了避免产生无效迭代故障位置，需对伪故障位置进行限制。因此，本文将故障支路编号及支路故障距离作为粒子组，使故障位置可表征为一个可唯一确定的可行解。故障位置可表示为 L_j ，即为后续PSO优化的参数，如式(18)所示。

$$L_j = (N_j, X_j) \quad (18)$$

式中： j 为当前优化迭代次数； N_j 为第 j 次迭代得到的支路编号， $N_j = 1, 2, \dots, N_{total}$ ， N_{total} 为集电线路支路总数； X_j 为第 j 次迭代得到的伪故障点距离左侧最近节点的距离， $X_j < X_{max}$ ， X_{max} 为集电线路支路最大长度。

优化目标即通过迭代寻找 L_j 的最优值，使时间信息差系数 ΔT 最小，因此，将式(17)作为适应度函数进行优化求解。

利用上述改进方法对伪故障位置进行迭代求解，使伪故障位置向真实故障位置不断靠近。基于式(15)一式(17)建立的时间信息差系数 ΔT ，不仅可

量化故障位置偏差程度,同时消除了 v_{tw} 对定位结果的影响。改进 PSO 求解定位过程如图 5 所示。图 5 中 N_{i-j} 、 X_{i-j} 和 L_{i-j} 分别表示第 j 次迭代时第 i 个支路编号、伪故障点距离左侧最近节点的距离和故障位置。

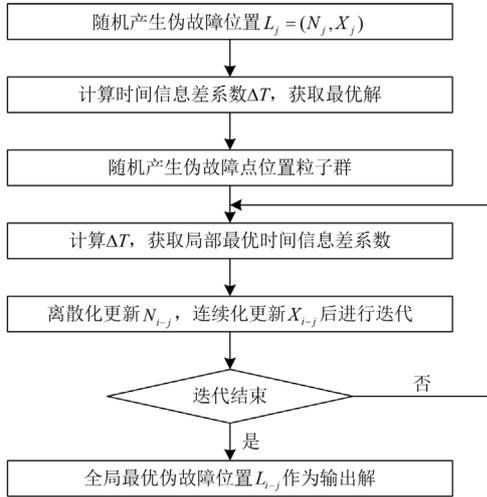


图 5 基于改进 PSO 的故障位置求解

Fig. 5 Fault location solution based on improved PSO

3 基于稀疏信息差值的故障定位方法

结合风电场集电线路结构特点,考虑到实际成本和应用情况,在保证故障定位精度的前提下,为了减少故障定位的测点数量。同时,考虑故障行波速度不确定的问题,提出一种基于稀疏信息差值的集电线路故障定位方法。本文将一个具有多条集电线路的风电场故障定位问题分为两个环节:故障集电线路识别和基于行波时差的故障位置优化求解。所提出的故障定位方法流程如图 6 所示。

1) 故障集电线路筛选阶段

风电场具有多条集电线路,为了初步缩小故障范围。该阶段对于一个具有 M 条集电线路的风电场,仅需 $M+1$ 个测点信息即可对故障范围进行初步筛选,为后续精准故障定位提供测点选择。当风电场内出现线路故障之后,从各集电线路末端和汇流端获取三相故障电压数据(v_a 、 v_b 、 v_c),并采用卡伦鲍尔变换计算其故障零序电压 v_0 。通过 VMD 确定 v_0 的第一本征模函数 IMF1。为了获取故障信号的时频全局特性,采用 ST 计算 IMF1 的时频特性矩阵,并基于式(5)计算不同测点信息之间的差异度确定故障集电线路。经过 VMD 和 ST 处理之后的故障时频特性可抑制测量噪声,在高噪声背景影响下,无需人工阈值,实现故障集电线路的筛选,删除大量冗余测点信息。



图 6 集电线路故障定位流程图

Fig. 6 Flow chart of fault location of collecting line

2) 故障定位阶段

集电线路确定之后,风电场定位问题可看作为多分支拓扑结构定位问题。基于风电场固有结构拓扑信息,分析故障后双端行波最短路径,建立时差矩阵。在上一环节判别结果的基础上,仅需双端两个测点信息即可实现集电线路精准定位。首先,根据集电线路判别结果提取集电线路首末端初始行波到达时间,并作差得到实测故障时差矩阵。在集电线路任意位置设置伪故障发生点,依据固有拓扑结构信息计算其最短传播路径,进而作差得到伪故障时差矩阵。将两个时差矩阵的差异度最小作为优化目标值,采用改进 PSO 不断更新假设故障的支路编号和具体位置,直至差异度最小,此时假设故障位置即为预测输出故障位置。基于式(16)伪故障矩阵可消除波速对定位精度的影响,该方法仅需双端测点信息,即可实现在忽略波速影响的前提下对多分支集电线路进行精准定位。

4 算例分析

4.1 仿真环境及案例设置

参照辽宁某风电场一期工程线路参数,在 Matlab/

Simulink 中建立如图 7 所示 WF 系统仿真模型，包含 15 台风电机组和 3 条集电线路(共计 27 条支路)。

本文所提方法需要额外安装行波量测系统实时采集故障信号，安装位置如图 7 中黑色原点 S0—S3。通过表 1 总结了系统的运行参数。

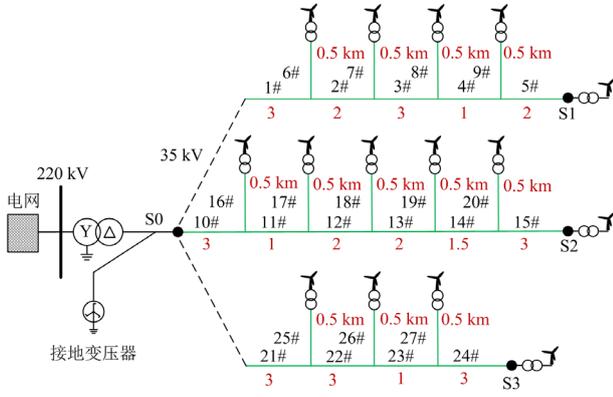


图 7 WF 集电线路拓扑结构

Fig. 7 Topological structure of WF collection lines

表 1 系统运行参数

Table 1 Operating parameters of the system

参数	数值
风电机容量/MVA	10
变压器	200 MW, 220 V/35 kV, Yg-D
箱式变压器	12 MW, 35 kV/690 V, Yg-D
系统频率/Hz	50
采样频率/MHz	1
线路长度/km	0.5

行波定位方法首先需要正确提取行波信号，其次标定行波波头，最后基于波头信息进行精准定位。本文采用文献[18]波头标定方法记录行波达到时间。因此，故障行波到达时间的处理及检测过程不再详细论述。同时，根据电力工业部电力规划设计总院发布的《电力系统设计手册》设置 35 kV 集电线路故障参数，详见表 2。

表 2 线路参数设置

Table 2 Line parameter settings

参数	取值	参数	取值
正序电阻	0.132 Ω/km	零序电阻	0.396 Ω/km
正序电抗	0.354 Ω/km	零序电抗	1.062 Ω/km
正序电容	—	零序电容	—

4.2 故障集电线路筛选结果分析

为了验证所提故障集电线路筛选方法的有效性，设置单相接地故障。不同案例下故障详细参数设置见表 3。

为了说明基于信息差异度的故障集电线路识别

的有效性，采用第 1 节描述方法，提取测点(S0、S1、S2 和 S3)故障信号 v_0 ，经 VMD 变换之后基于式(4)计算其余测点 S1—S3 故障数据的模矩阵 Q_{S1} 、 Q_{S2} 和 Q_{S3} 。风电场集电线路案例 1 故障后各测点模矩阵 Q_{Si} 和测点信息差异度 ξ_{Sj}^{Si} 计算结果如表 4 所示。

表 3 故障案例参数设置

Table 3 Fault case parameter settings

案例	集电线路	支路编号	距离最近节点 故障距离/km	距离左侧测点 故障距离/km
1	S0 到 S1	3#	1.4	6.4
2	S0 到 S1	6#	0.2	3.2
3	S0 到 S1	7#	0.1	5.1
4	S0 到 S2	12#	1.0	5.0
5	S0 到 S2	14#	0.7	8.7
6	S0 到 S2	16#	0.2	6.2
7	S0 到 S3	23#	0.5	6.5
8	S0 到 S3	26#	0.1	7.1
9	S0 到 S3	27#	0.1	7.1

表 4 集电线路故障后各测点信息差异度计算结果

Table 4 Calculation results of information difference at each measuring point after the fault of the power collection line

变量	差异度	
	无噪声影响	SNR为20 dB
$\sum \sum (Q_{S0})^2$	178 608	181 267
$\sum \sum (Q_{S1})^2$	369 689	365 706
$\sum \sum (Q_{S2})^2$	177 859	178 711
$\sum \sum (Q_{S3})^2$	179 252	183 418
ξ_{S1}^{S0}	0.3485	0.3372
ξ_{S2}^{S0}	0.0021	0.0071
ξ_{S3}^{S0}	0.0018	0.0059

同故障案例 1，采用相同方法计算所有故障案例下各测点信息差异度 ξ_{Sj}^{Si} ，集电线路筛选过程及结果如表 5 所示。

表 5 集电线路筛选过程及结果

Table 5 Selection process and results of power collection lines

案例	ξ_{S1}^{S0}	ξ_{S2}^{S0}	ξ_{S3}^{S0}	预测结果	是否正确
1	0.3485	0.0021	0.0018	S0 到 S1	√
2	0.6341	0.0724	0.0735	S0 到 S1	√
3	0.4628	0.0061	0.0061	S0 到 S1	√
4	0.0109	0.2561	0.0111	S0 到 S2	√
5	0.0237	0.3159	0.0231	S0 到 S2	√
6	0.0079	0.5474	0.0072	S0 到 S2	√
7	0.0032	0.0026	0.4496	S0 到 S3	√
8	0.0981	0.0764	0.8574	S0 到 S3	√
9	0.1096	0.1137	0.9168	S0 到 S3	√

从表 4 和表 5 可以看出:

1) 在 20 dB 噪声影响下, 由于原始故障信号发生变化, $\xi_{S_j}^{S_i}$ 随之产生波动。案例 1 中 $\xi_{S_1}^{S_0}$ 波动最为明显, 由 0.3485 变为 0.3372, 但 $\xi_{S_j}^{S_i}$ 仍可明显区分故障位置。

2) 当风电场 S0 到 S1 之间集电线路发生故障后, 案例 1—案例 3 最大信息差异度均为 $\xi_{S_1}^{S_0}$ 。当风电场 S0 到 S2 之间发生故障后, 案例 4—案例 6 最大信息差异度均为 $\xi_{S_2}^{S_0}$ 。当风电场 S0 到 S3 之间发生故障之后, 尽管 3 个故障发生在 3 个相邻支路且其线路长度均很短, 但案例 7—案例 8 最大信息差异度仍然为 $\xi_{S_3}^{S_0}$ 。故障集电线路不同游测点信息差异度 $\xi_{S_j}^{S_i}$ 明显大于其余测点, 预测结果与实际故障结果相同。上述结果验证了基于信息差异度的集电线路故障筛选方法的有效性。

4.3 故障定位结果分析

通过上述集电线路筛选方法确定了风电场线路的具体故障集电线路。为了获得准确的故障信息, 需要进一步计算故障位置。

本文采用改进 PSO 算法不断更新伪故障位置对集电线路进行精准定位, 当且仅当真实故障点 F 和优化结果伪故障点 F*重合时, T_F 和 T_{F^*} 差值最小, 即目标函数 ΔT 最小。本文改进 PSO 主要参数设置如表 6 所示。

表 6 改进 PSO 算法参数设置

Table 6 Parameter setting of improved PSO algorithm

参数	取值
群体规模	50
迭代次数	300
惯性权重	0.9
局部学习因子	0.1
全局学习因子	0.2
支路编号范围	1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11
第一变量速度上、下限	10、-10
距离范围	0~3
第二变量速度上、下限	3、-3

为了说明所提集电线路故障定位方法的有效性, 以表 3 中描述的 9 个故障案例为例。根据 4.2 节确定的故障集电线路结果, 提取对应两测点行波到达时间, 基于式(16)计算故障行波时间信息关系 T_F 。以故障支路编号和故障点为伪故障位置, 式(17)作为优化目标, 采用改进 PSO 算法不断更新伪故障位置, 从而逼近故障行波时间信息关系 T_F 。集电线路故障定位结果如表 7 所示。

从表 7 可以看出:

1) 当风电场 S0 到 S1 之间集电线路发生故障之后, 所提出的故障定位方法的绝对误差分别为 31.6 m、35.3 m 和 38.7 m; 当风电场 S0 到 S2 之间集电线路发生故障之后, 绝对误差分别为 58.1 m、20.9 m 和 49.9 m; 当风电场 S0 到 S3 之间集电线路发生故障之后, 绝对误差分别为 29.4 m、24.2 m 和 42.9 m。

2) 由定位结果可以看出, 本文定位方法能够准确进行故障定位, 最小定位误差为 20.9 m, 最大定位误差为 58.1 m, 平均定位误差 36.78 m, 定位精度高。

表 7 故障定位结果

Table 7 Fault location results

案例	t_{S_0}/ms	t_{S_n}/ms	优化结果/km	绝对误差/m
1	0.022	0.016	3#, 1.3684	31.6
2	0.011	0.028	6#, 0.2353	35.3
3	0.017	0.021	7#, 0.1387	38.7
4	0.017	0.026	12#, 0.9419	58.1
5	0.030	0.013	14#, 0.7209	20.9
6	0.011	0.033	16#, 0.2499	49.9
7	0.022	0.012	23#, 0.4706	29.4
8	0.021	0.014	26#, 0.0758	24.2
9	0.025	0.011	27#, 0.1429	42.9

4.4 定位算法鲁棒性分析

为了验证所提故障定位方法的优越性, 考虑到故障初相角和过渡电阻对定位结果的影响, 对上述故障条件进行仿真验证。

在 S0 到 S1 内支路 13#距离左侧最近节点 1 km 处进行故障仿真。故障初相角取 30°~90°、过渡电阻取 1~200 Ω 。集电线路定位结果见表 8。

表 8 集电线路筛选过程及结果

Table 8 Selection process and results of collecting line

故障初相角/(°)	过渡电阻/ Ω	筛选结果	定位结果/km	绝对误差/m
30	1	S0 到 S1	13#, 1.0348	34.8
	10	S0 到 S1	13#, 1.0447	44.7
	50	S0 到 S1	13#, 0.9275	72.5
	200	S0 到 S1	13#, 1.0879	87.9
60	1	S0 到 S1	13#, 0.9715	28.5
	10	S0 到 S1	13#, 1.0449	44.9
	50	S0 到 S1	13#, 0.9282	71.8
	200	S0 到 S1	13#, 1.0843	84.3
90	1	S0 到 S1	13#, 0.9466	53.4
	10	S0 到 S1	13#, 1.0765	76.5
	50	S0 到 S1	13#, 1.0873	87.3
	200	S0 到 S1	13#, 1.0899	89.9

从表 8 可以看出: 所提出的故障定位方法不受故障过渡电阻和故障初相角的影响, 故障集电线路

筛选结果准确率可达 100%，最小定位误差为 28.5 m。尽管随着过渡电阻的增大，定位误差随之增大，但误差仍小于 89.9 m，依旧保持着较高的定位精度。因此，当故障过渡电阻和故障初相角变化时，所述方法仍可成功定位集电线路故障。

4.5 定位算法的对比

为了验证所提集电线路故障定位方法的优越性，将文献[18]所述集电线路定位方法和传统行波定位方法应用于 WF 故障定位问题中。

双端定位方法假设已经确定故障支路，直接使用离故障点最近的 2 个测量点进行故障定位。表 9 展示了不同方法在表 2 中 8 个故障案例下故障定位情况对比。

表 9 不同方法集电线路故障定位情况对比

Table 9 Comparison of fault localization of collecting lines using different methods

	本文方法	改进行波定位方法	传统双端行波定位方法
测点需求	4	6	30
集电线路辨别	√	√	×
故障支路辨别	√	√	×
精准故障定位	√	√	√
平均定位误差/m	38.4	112.5	150.2

从表 9 可以看出：传统双端定位方法无法直接应用于集电线路的多分支线路结构。因此，需要大量测点将多分支问题转化成单支路线路定位问题，对于图 7 所示风电场集电线路定位时需要 30 个测点才可实现精准故障定位。改进行波定位方法通过先判别故障集电线路后定位的思路，仅需 6 个测点即可实现集电线路定位问题。但该方法步骤繁琐，需要 3 步求解，定位误差也高于本文所提方法。本文方法仅需 4 个测点信息，构建行波时间信息关系，平均定位误差为 38.4 m，定位精度较高。

5 结论

本文提出一种基于稀疏信息差值的 WF 集电线路行波定位新方法，可对具有多支路的集电线路进行高效、精准故障定位。主要结论如下所述。

1) 该方法按照集电线路对复杂拓扑结构的 WF 划分故障区域，分析各故障集电线路首末测点信息差异度关系，仅需少量测点信息，建立集电线路初筛原则，无需人工阈值，思路简单，可实施性强。

2) 本文基于构建的波头时间信息差定义故障位置时间信息差系数，利用改进 PSO 算法对故障支路和故障位置同时进行求解，消除了行波波速对时间信息差的影响。

3) 通过设置不同的故障条件进行故障模拟，案例结果表明，该方法仅需在每个区域首末端安装测量装置，在已知波头时间信息的基础上采用优化算法的思路，实现仅用少量测点信息实现对风电场集电线路多分支线路的精准定位。相比于已有监测方案，在保证定位精度的同时，可大幅降低多分支集电线路故障定位成本。

参考文献

- [1] 李成, 张婕, 石轲, 等. 面向风电场的主动支撑电网型分散式储能控制策略与优化配置[J]. 中国电力, 2023, 56(12): 238-247.
LI Cheng, ZHANG Jie, SHI Ke, et al. Control strategy and optimal configuration of active-support-grid type decentralized energy storage system for wind farms[J]. Electric Power, 2023, 56(12): 238-247.
- [2] 郑海林, 朱振山, 温步瀛, 等. 多主体博弈下基于改进 NashQ 算法的风电场调度策略[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6): 62-72.
ZHENG Hailin, ZHU Zhenshan, WEN Buying, et al. A wind power dispatching strategy based on improved NashQ under multi-agent game[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(6): 62-72.
- [3] 王博, 詹红霞, 张勇, 等. 考虑风电不确定性的风蓄火联合优化经济调度研究[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 93-100.
WANG Bo, ZHAN Hongxia, ZHANG Yong, et al. Combined optimal economic dispatch of wind-storage-fire considering wind power uncertainty[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 93-100.
- [4] 崔子轩, 袁婉玲, 郝正航, 等. 基于电流幅值关系与制动系数相配合的有源配电网差动保护方案[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(12): 1-7.
CUI Zixuan, YUAN Wanling, HAO Zhenghang, et al. Differential protection scheme of active distribution network based on current amplitude relation and braking coefficient[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(12): 1-7.
- [5] 王宾, 任萱. 中性点经小电阻接地风电场集电线路单相接地故障测距研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2136-2143.
WANG Bin, REN Xuan. Single-line-to-ground fault location in wind farm collection line with neutral point grounding with resistor[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2136-2143.
- [6] 李永丽, 辛双乔, 李涛, 等. 基于多端信息的风电场集电线路单相接地故障定位算法[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 2-11.
LI Yongli, XIN Shuangqiao, LI Tao, et al. Single phase grounding fault location algorithm of wind farm collector lines based on multi-terminal information[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 2-11.
- [7] 高正创, 李凤婷, 解超, 等. 基于电压行波陡度的柔性直流送出线路快速保护方案[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4): 84-93.

- GAO Zhengchuang, LI Fengting, XIE Chao, et al. Fast protection scheme for flexible DC transmission line based on voltage traveling wave steepness[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(4): 84-93.
- [8] 黄飞, 陈纪宇, 戴健, 等. 基于特征暂态零模电流偏差系数的有源配电网单相故障定位方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(20): 12-21.
- HUANG Fei, CHEN Jiyu, DAI Jian, et al. Single-phase fault location method for an active distribution network based on the skewness coefficient of characteristic transient zero-mode current[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(20): 12-21.
- [9] SHU Hongchun, WANG Shixin, LEI Shunguang. Single-ended protection method for hybrid HVDC transmission line based on transient voltage characteristic frequency band[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2023, 8(2): 453-463.
- [10] 李练兵, 孙腾达, 曾四鸣, 等. 基于多端行波时差的配电网故障定位方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(3): 140-147.
- LI Lianbing, SUN Tengda, ZENG Siming, et al. Fault location method for distribution networks based on traveling wave time difference[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(3): 140-147.
- [11] 罗美玲, 李紫肖, 郑涛, 等. 基于模糊多判据融合的单端暂态量保护新方案[J]. *中国电力*, 2024, 57(3): 60-72.
- LUO Meiling, LI Zixiao, ZHENG Tao, et al. Single terminal transient protection scheme based on fuzzy multi-criteria fusion[J]. *Electric Power*, 2024, 57(3): 60-72.
- [12] JAMALI S, BAHMANYAR A, RANIBAR S. Hybrid classifier for fault location in active distribution networks[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2020, 5(2): 174-182.
- [13] 郭海清. 基于行波法的铁路 10 kV 自闭贯通线路故障定位研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2019.
- GUO Haiqing. Study on fault locating of 10 kV automatic blocking and continuous transmission lines of railway based on traveling wave method[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019.
- [14] AZIZI S, SANAYE-PASAND M, ABEDINI M, et al. A traveling-wave-based methodology for wide-area fault location in multiterminal DC systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, 29(6): 2552-2560.
- [15] HAMIDI R J, LIVANI H. Traveling-wave-based fault-location algorithm for hybrid multiterminal circuits[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017, 32(1): 135-144.
- [16] ROBSON S, HADDAD A, GRIFFITHS H. Fault location on branched networks using a multiended approach[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, 29(4): 1955-1963.
- [17] 夏翊翔, 李泽文, 雷柳, 等. 基于动态虚拟故障的行波网络定位新方法[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(14): 4868-4878.
- XIA Yixiang, LI Zewen, LEI Liu, et al. A new method of traveling wave network location based on dynamic virtual fault[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(14): 4868-4878.
- [18] WANG Xiaodong, GAO Xing, LIU Yingming, et al. Bi-level decision matrix based fault location method for multi-branch offshore wind farm transmission lines[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2022, 141(10): 1-13.
- [19] 邓丰, 李欣然, 曾祥君, 等. 基于波形唯一和时-频特征匹配的单端行波保护和故障定位方法[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(5): 1475-1487.
- DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun, et al. Research on single-end traveling wave based protection and fault location method based on waveform uniqueness and feature matching in the time and frequency domain[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(5): 1475-1487.
- [20] 杨冬锋, 王鹤, 刘晓军, 等. 基于 VMD-SVD 的多端柔直电网故障测距方案[J]. *电网技术*, 2022, 46(8): 3084-3095.
- YANG Dongfeng, WANG He, LIU Xiaojun, et al. Fault location scheme for multi-terminal MMC-HVDC system based on VMD-SVD[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(8): 3084-3095.
- [21] 曾哲, 邓丰, 张振, 等. 基于 VMD-WVD 的故障行波全波形时-频分析方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(7): 49-57.
- ZENG Zhe, DENG Feng, ZHANG Zhen, et al. Time-frequency analysis of a traveling wave based on VMD and WVD[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(7): 49-57.
- [22] 权文杰, 童晓阳, 张广骁. 基于 S 变换行波能谱矩阵相似度的柔性直流单端保护方案[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(7): 178-186.
- QUAN Wenjie, TONG Xiaoyang, ZHANG Guangxiao. Single-end flexible DC protection scheme based on similarity of S-transform energy spectrum matrix of traveling wave[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(7): 178-186.
- [23] 高淑萍, 李晓芳, 宋国兵, 等. 基于 Pearson 相关系数与广义 S 变换的低压直流微电网的故障选线方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(15): 120-129.
- GAO Shuping, LI Xiaofang, SONG Guobing, et al. Fault line selection method of a low-voltage DC microgrid based on the Pearson correlation coefficient generalized S-transform[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(15): 120-129.

收稿日期: 2024-03-01; 修回日期: 2024-05-21

作者简介:

高兴(1998—), 男, 博士研究生, 研究方向为风电场故障诊断、故障定位技术; E-mail: gaoping@smail.sut.edu.cn

王晓东(1978—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为风电场智能故障监测技术、大型风电机组控制技术; E-mail: wxd@sut.edu.cn

刘颖明(1973—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为风电机组单机与集群控制、新能源发电系统。E-mail: 13555730215@163.com

(编辑 张颖)